

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/309741832>

# МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Conference Paper · September 2016

CITATIONS

0

READS

369

9 authors, including:



Maxim Leman

14 PUBLICATIONS 6 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



The Burabay National Resort Park ecosystems assessment for sustainable development of environmental recreational potential [View project](#)



"Water security of the Republic of Kazakhstan - sustainable water supply strategy" [View project](#)

И. М. МАЛЬКОВСКИЙ, Л. С. ТОЛЕУБАЕВА, Т. Е. СОРОКИНА,  
А. З. ТАИРОВ, Е. М. ПУЗИКОВ, А. ТОЛЕКОВА, Д. У. АБДИБЕКОВ,  
М. В. ДОЛБЕШКИН, Р. Д. ПОВЕТКИН

ТОО «Институт географии», Алматы, Казахстан

## МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

*Қазақстанды сумен қамтамасыз етудің алаптық жүйесінің дамуын стратегиялық жобалау үшін стохастикалық және белгісіздік қасиеттерімен сипатталатын имитациялық динамикті-стохастикалық модельдеу әдістемесін қолдану негізделген. Арал-Сырдария, Балқаш және Ертіс алаптарының имитациялық моделінің құрылымдары Қазақстан Республикасының сумен қамтамасыз етудің бірыңғай жүйесінің негізін қалыптастырушы ретінде құрастырылған. Модельдің C# бағдарламалау тіліне аудармалау жүргізілді және модельдеу процесінің үш өлшемді визуализация әдістемесі құрастырылды.*

*Обосновано применение методологии имитационного динамико-стохастического моделирования для стратегического планирования развития бассейновых систем водообеспечения Казахстана, характеризующихся свойствами неопределенности и стохастичности. Разработана структура имитационных моделей Арало-Сырдаринского, Иле-Балкашского и Ертысского бассейнов как основа формирования Единой системы водообеспечения Республики Казахстан. Проведена трансляция модели на язык программирования C# и разработана методика двумерной визуализации процесса моделирования.*

*Application of methodology of simulation dinamiko-stochastic modeling for strategic planning of development of the pool-type systems of water supply of Kazakhstan which are characterized by properties of uncertainty and stochasticity is justified. The structure of simulation models of Aralo-Syrdariinsky, ile-Balkashsky and Ertisky basins as bases of formation of the Single system of water supply of the Republic of Kazakhstan is developed. Broadcast of model on the C# programming language is made and the technique of two-dimensional visualization of process of simulation is developed.*

**Введение.** Имитационное моделирование систем водообеспечения (СВО) представляет собой численный метод проведения на ЭВМ вычислительных экспериментов с математическими моделями, имитирующими поведение реальных объектов во времени в течение заданного периода. При этом функционирование таких объектов описывается набором алгоритмов, которые имитируют вероятностную природу формирования ресурсов речного стока [1].

Бассейновые СВО характеризуются свойствами сложных систем: неопределенностью и стохастичностью, обусловленными однозначной непредсказуемостью масштабов водохозяйственной деятельности в сопредельных странах и вероятностной природой гидрометеорологических процессов и явлений, определяющих величину располагаемых водных ресурсов. Динамико-стохастическое моделирование (метод Монте–Карло) представляет собой способ изучения сложных систем, подверженных случайным возмущениям, с помощью имитационных моделей.

Ранее метод Монте–Карло применялся при расчетах регулирования речного стока и водно-энергетических расчетах [2, 3]. Предложенный метод, являясь современным способом изучения сложных систем в математике, физике, естественных науках, в настоящей работе впервые применен к решению задач развития НВХК, в том числе водообеспечения природно-хозяйственных систем.

**Постановка проблемы.** Системы водообеспечения (СВО) Арало-Сырдаринского, Иле-Балкашского и Ертысского бассейнов, представляющие собой совокупность водоисточников и водопользователей с объединяющими их средствами водорегулирования и водораспределения, являются ключевыми звеньями национального водохозяйственного комплекса (НВХК) (рисунок 1).



Рисунок 1 – Карта-схема бассейновых систем водообеспечения Казахстана

В пределах бассейновых СВО формируется до 80% возобновляемых ресурсов речного стока, сосредоточено 73% разведанных запасов подземных вод. При этом Арало-Сырдаринский и Иле-Балкашский бассейны являются наиболее водозатратными системами – интегральный спрос на воду населения, производства, природных объектов составляет половину общереспубликанского. Сильна зависимость указанных бассейнов от трансграничного стока: А-С – 89%, И-Б – 44%. СВО являются реальным и потенциальным бассейнами «водного кризиса». Оба бассейна – потенциальные «реципиенты» перебросок речного стока из Ертысского бассейна- «донора» [4, 5].

На рисунке 2 приведена схема потенциальных межбассейновых и трансграничных водохозяйственных связей Единой системы водообеспечения Республики Казахстан (ЕСВО РК).

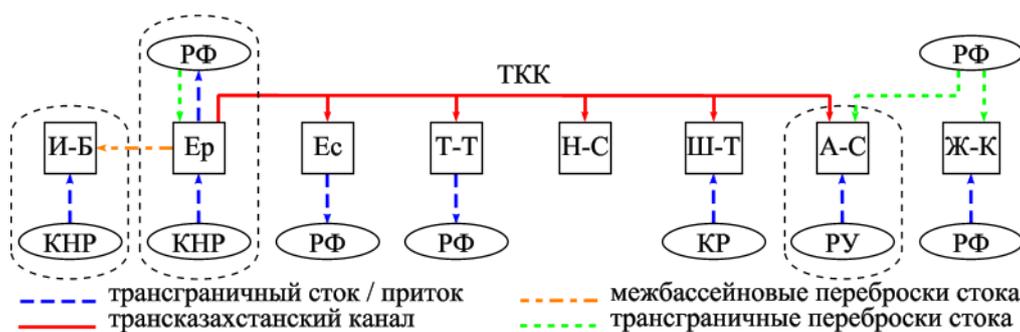


Рисунок 2 – Схема потенциальных межбассейновых и трансграничных водохозяйственных связей ЕСВО РК.  
Страны: КНР – Китайская народная республика; КР – Кыргызская Республика; РУ – Республика Узбекистан; РФ – Российская Федерация. Водохозяйственные бассейны: А-С – Арало-Сырдаринский; И-Б – Иле-Балкашский; Ер – Ертысский; Ес – Есильский; Ж-К – Жайык-Каспийский; Н-С – Нура-Сарысуский; Т-Т – Тобыл-Торгайский; Ш-Т – Шу-Таласский

Трансказахстанский канал (ТКК) станет основой формирования Единой системы водообеспечения Республики Казахстан, объединяющей существующие и перспективные межбассейновые водохозяйственные связи, обеспечивая повышение эффективности использования ресурсов речного стока для достижения социальных, экологических и экономических целей развития страны [5, 6].

**Методика исследования.** Методика динамико-стохастического моделирования состоит из следующих этапов:

1. Моделирование на ЭВМ псевдослучайных последовательностей годового стока с заданным законом распределения вероятностей (метод Монте– Карло).

2. Использование полученных числовых последовательностей в динамических имитационных математических моделях регулирования и распределения водных ресурсов в природно-хозяйственных системах.

3. Статистическая обработка результатов моделирования с оценкой системы водообеспечения по критериям надежности и риска.

Процесс последовательной разработки имитационной модели системы водообеспечения начинается с создания простой модели, которая затем постепенно усложняется в соответствии с требованиями, предъявляемыми к решаемой проблеме.

После сформулированного начального определения проблемы начинается этап построения модели исследуемой системы, включающий статистическое и динамическое описание системы. В статистическом описании определяются элементы системы и их характеристики, а в динамическом – взаимодействия элементов системы, в результате которых происходит изменение ее состояния во времени.

Процесс формулирования модели во многом является искусством, в ходе которого понимается структура системы, выявляются правила ее функционирования и выделяется в них самое существенное, исключая ненужные детали. Модель формируется простой для понимания и в то же время достаточно сложной, чтобы адекватно отображать характерные черты реальной системы. Наиболее важными являются решения относительно достоверности принимаемых упрощений и допущений, определяющих состав элементов и взаимодействий между ними. Уровень детализации модели зависит от цели ее создания. Рассмотрению подлежат только те элементы системы, которые имеют существенное значение для решения исследуемой проблемы. «Первый эскиз» модели подлежит анализу и обсуждению. На этапах формулирования проблемы и моделирования осуществляется тесное взаимодействие между разработчиками модели и ее пользователями, что помогает обеспечить успешную реализацию результатов имитационного исследования.

На этапе разработки модели определяются требования к входным данным. Обычно значения таких входных данных задаются на основе некоторых гипотез или предварительного анализа. В некоторых случаях точные значения одного (и более) входных параметров оказывают небольшое влияние на результаты прогонов модели. Чувствительность получаемых результатов к изменению входных данных может быть оценена путем проведения серии имитационных прогонов для различных значений входных параметров. Имитационная модель, следовательно, может использоваться для уменьшения затрат времени и средств на уточнение входных данных.

Следующей задачей является перевод модели в форму, доступную для ЭВМ. Основным критерием выбора языка программирования для компьютерной реализации модели служит объектная ориентированность. Эта парадигма языка основана на представлении всего в виде объектов, являющихся экземплярами того или иного класса, и воплощает применение концепции абстрагирования.

На этапах верификации и валидации осуществляется оценка функционирования имитационной модели. На этапе верификации определяется, соответствует ли запрограммированная для ЭВМ модель замыслу разработчика. Это обычно осуществляется путем ручной проверки вычислений, а также может быть использован ряд статистических методов [7].

Установление адекватности имитационной модели исследуемой системе осуществляется на этапе валидации. Валидация модели обычно выполняется на уровне входных данных, элементов модели, подсистем и их взаимосвязей. Проверка адекватности разработанной модели включает сравнение ее структуры со структурой системы, а также сравнение результатов реализации элементарных функций и решений в модели и системе.

Условия проведения машинных прогонов модели определяются на этапах стратегического и тактического планирования. Задача стратегического планирования заключается в разработке эффективного плана эксперимента, в результате которого либо выясняется взаимосвязь между управляемыми переменными, либо находится комбинация значений управляемых переменных,

минимизирующая или максимизирующая отклик имитационной модели. В тактическом планировании в отличие от стратегического решается вопрос о том, как в рамках плана эксперимента провести каждый имитационный прогон, чтобы получать наибольшее количество информации из выходных данных. Важное место в тактическом планировании занимают определение начальных условий имитационных прогонов и методы снижения дисперсии среднего значения отклика модели [7].

Следующие этапы в процессе имитационного исследования – проведение машинного эксперимента и анализ результатов – включают прогон имитационной модели на компьютере и интерпретацию полученных выходных данных. При использовании результатов имитационных экспериментов для подготовки выводов или проверки гипотез о функционировании реальной системы применяются статистические методы.

Последним этапом в процессе имитационного исследования является реализация полученных решений и документирование имитационной модели и ее использования.

**Результаты исследования.** На рисунке 3 представлена структура начального варианта модели – «грубый прогноз», где использованы укрупненные временные интервалы развития ЕСВО РК ( $T$ ), агрегированные показатели водных ресурсов ( $W$ ) и спроса на воду ( $V$ ), укрупненные пространственные единицы ( $i$ ), оцениваемые совокупностью статистических критериев водной безопасности ( $\Phi$ ).

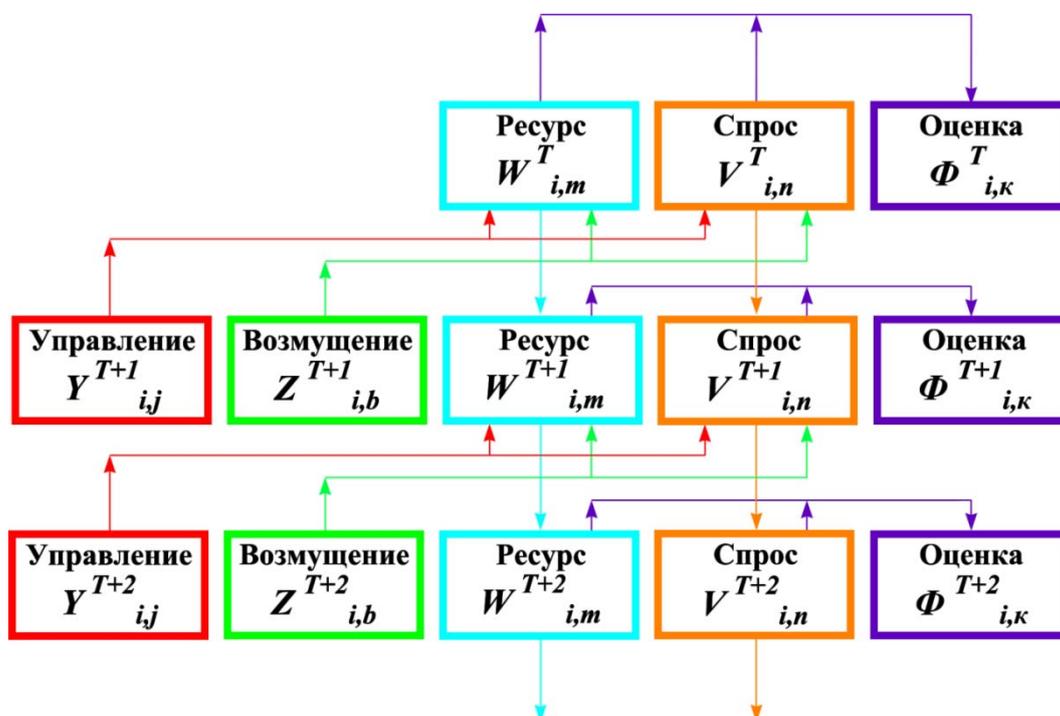


Рисунок 3 – Имитационная динамико-стохастическая модель сценариев водообеспечения бассейновых ПХС

Состояние объекта управления ЕСВО РК в любой момент времени ( $T$ ) в разрезе бассейновых ПХС ( $i$ ) однозначно определяется многомерным вектором – располагаемыми водными ресурсами ПХС в целом и распределением их между компонентами ( $W_{i,m}^T$ ), а также спросом на воду ( $V_{i,n}^T$ ). В результате определенного воздействия система может переходить из одного состояния в другое с определенной степенью эффективности с точки зрения принятых критериев. Эти воздействия представляются в виде многомерного вектора ( $Y_{i,y}^T$ ), где его составляющие представляют собой совокупность средств регулирования и распределения водных ресурсов. Происходящие в системе процессы протекают под влиянием ряда случайных факторов, образующих вектор возмущений ( $Z_{i,b}^T$ ), компонентами которого является однозначно непредсказуемый режим водоисточников ПХС [1].

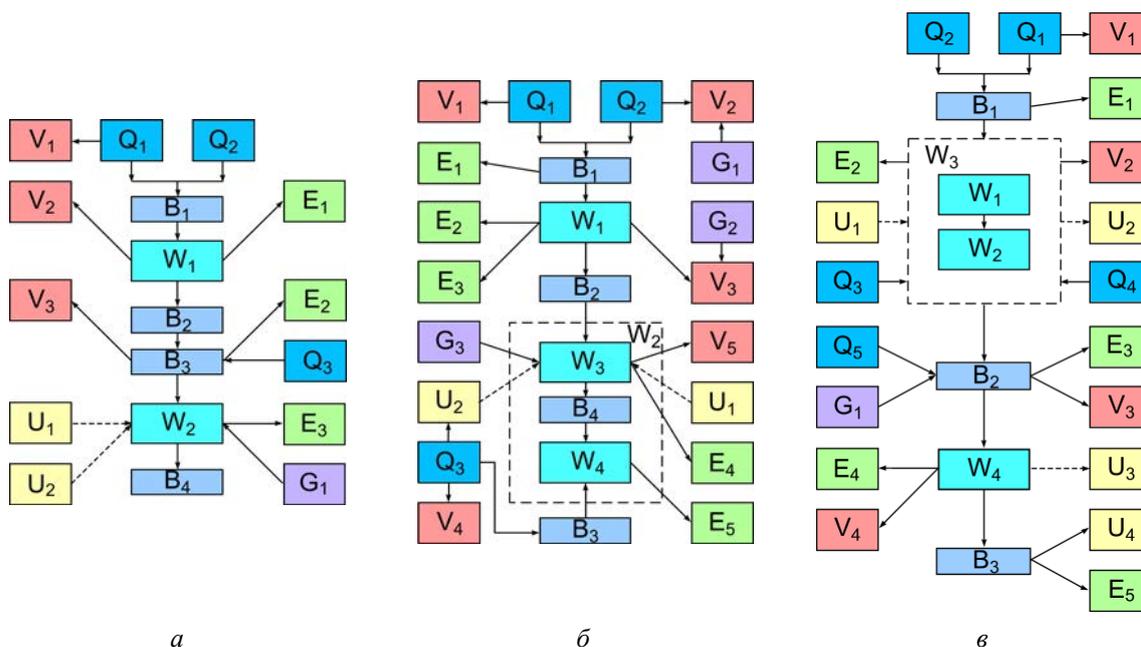


Рисунок 4 – Структура имитационной динамико-стохастической модели системы водообеспечения:  
 а – Арало-Сырдаринская; б – Иле-Балкашская; в – Ертисская

Системы водообеспечения исследуемых водохозяйственных бассейнов имеют следующую структуру (рисунок 4, таблица):

- возобновляемые ресурсы речного стока бассейнов слагаются из местного и трансграничного стока (с территории КНР и РУ);
- системным узлом управления являются гидроузлы с водохранилищами длительного регулирования стока: Капшагайский, Буктырминский (многолетний) и Шардаринский, Шульбинский (сезонный);
- основными природными водопользователями в бассейне являются речные дельты и поймы рек;
- основными производственными водопользователями в бассейне являются, промышленность, коммунальное и сельское хозяйство с водозаборами (существующими и потенциальными) из речного русла, регулирующего водохранилища;
- разведанные запасы подземных вод учитываются в гидравлической связи с поверхностными водами;
- рассматриваются варианты перебросок речного стока из Ертисского бассейна потенциальные (Трансказахстанский канал, канал Буктырма– Балкаш) и существующие (канал им. К. И. Сапаева), а также возможные переброски стока в Ертисский бассейн части стока российских рек (Верхне-Катунская).

Компьютерная реализация имитационных моделей систем водообеспечения Иле-Балкашского, Арало-Сырдаринского, Ертисского бассейнов выполнена на объектно-ориентированном языке программирования C#. Разработанный программный комплекс включает совокупность модулей: графический интерфейс, математические функции, интерактивный анализ, взаимодействие с операционной системой (рисунок 5) [8-10].

Проведена оценка адекватности имитационной модели исследуемой системе путем ручных прогонов (процедуры валидации и верификации) [11– 13].

Разработаны двумерные модели визуализации процесса имитационного моделирования исследуемых систем водообеспечения с анимацией ее динамики на основе схематических обозначений объектов, их связей и расчетных параметров (рисунок 6). Специально разработанные модули включают алгоритм изменения параметров полигональных объектов в зависимости от входящих в модель расчетных параметров; алгоритм определения толщины линий, характеризующих взаимосвязи водных объектов; алгоритм изменения цвета объектов визуализации, основанный на табличной форме связи цвета и параметров объекта.

## Структура имитационной динамико-стохастической модели систем водообеспечения

Обозначение	Системы водообеспечения		
	Арало-Сырдаринская	Иле-Балкашская	Ертисская
Водоисточники поверхностные			
$Q_1$	Трансграничный сток р. Сырдария	Трансграничный сток р. Иле	Трансграничный сток р. Кара Ертис
$Q_2$	Местный сток (р. Келес)	Местный сток притоков р. Иле	Местный сток р. Кальджир
$Q_3$	Местный сток (р. Арысь)	Сток восточных рек	Местный сток р. Буктырма, р. Курчум и др.
$Q_4$			Местный сток р. Базарка, р. Кендерлык и др.
$Q_5$			Местный сток р. Уба, р. Ульба
Водоисточники подземные			
$G_1$	Приток подземных вод в Северное Аральское море	Копя-Илейский бассейн	Приток подземных вод
$G_2$		Южно-Балкашский бассейн	
$G_3$		Приток подземных вод в озеро Балкаш	
Водопользователи коммунально-бытовые, промышленные, сельскохозяйственные			
$V_1$	Узбекская часть бассейна р. Сырдария	Китайская часть бассейна р. Иле	Китайская часть бассейна Ертис
$V_2$	Верхний бьеф Шардаринского вдхр.	Верховья бассейна р. Иле	Верховья бассейна
$V_3$	Нижний бьеф Шардаринского вдхр.	Низовья бассейна р. Иле	Средняя часть бассейна
$V_4$		Бассейн восточных рек	Низовья бассейна
$V_5$		Западное Прибалкашье	
Перераспределение речного стока			
$U_1$	Ертис-Сырдария	Буктырма – Балкаш	Верхне-Катунская переброска
$U_2$	Волга-Сырдария	Каратал – Иле	Забор в Иле-Балкашский бассейн
$U_3$			Забор в ТКК
$U_4$			Забор в КиКС
Наполнение водоемов			
$W_1$	Шардаринское вдхр.	Капшагайское вдхр.	Жайсанская часть Буктырминского вдхр.
$W_2$	Северное Аральское море	Озеро Балкаш	Буктырминское вдхр.
$W_3$		Западный Балкаш	Буктырминское вдхр. и оз. Жайсан
$W_4$		Восточный Балкаш	Шульбинское водохранилище
Русловой сток			
$B_1$	Приток р. Сырдарии в Шардаринское вдхр.	Приток р. Иле в Капшагайское вдхр.	Приток в Буктырминское вдхр.
$B_2$	Попуски из Шардаринского вдхр.	Приток Иле в Западный Балкаш	Приток в Шульбинское вдхр.
$B_3$	Водоприток в САМ	Приток восточных рек в Восточный Балкаш	Попуски в Российскую Федерацию
$B_4$	Сброс в Большое море	Балансовый переток Западный Балкаш – Восточный Балкаш	
Водопользователи экологические			
$E_1$	Потери воды в Шардаринском вдхр.	Верховья бассейна	Русловые потери
$E_2$	Русловые экозатраты воды в низовьях	Капшагайское вдхр.	Буктырминское вдхр.
$E_3$	Северное Аральское море	низовья бассейна	Русловые потери
$E_4$		Западный Балкаш	Шульбинское вдхр.
$E_5$		Восточный Балкаш	Русловые потери

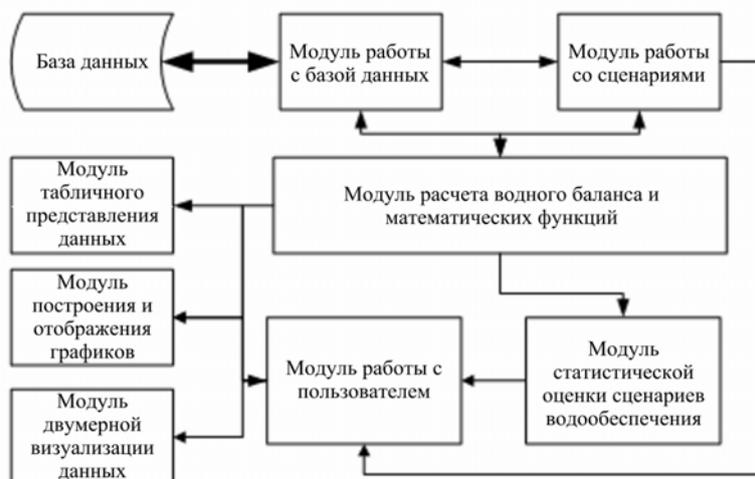
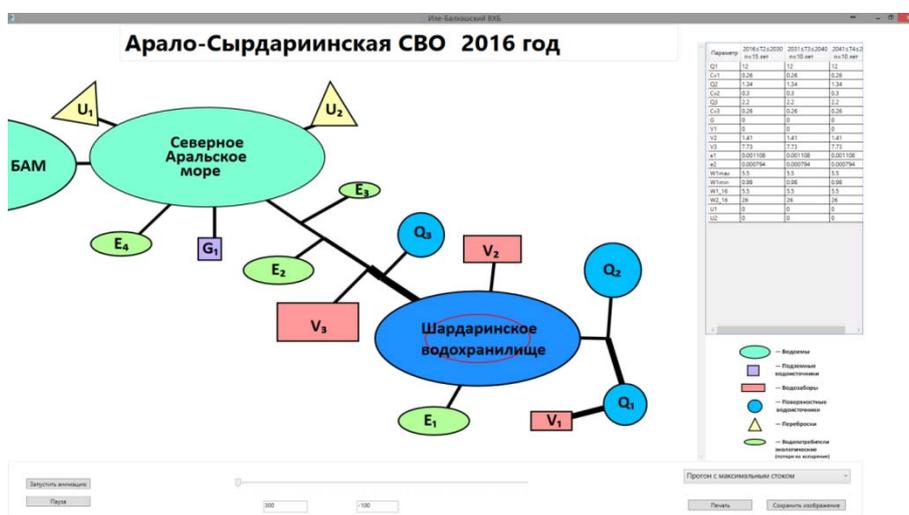
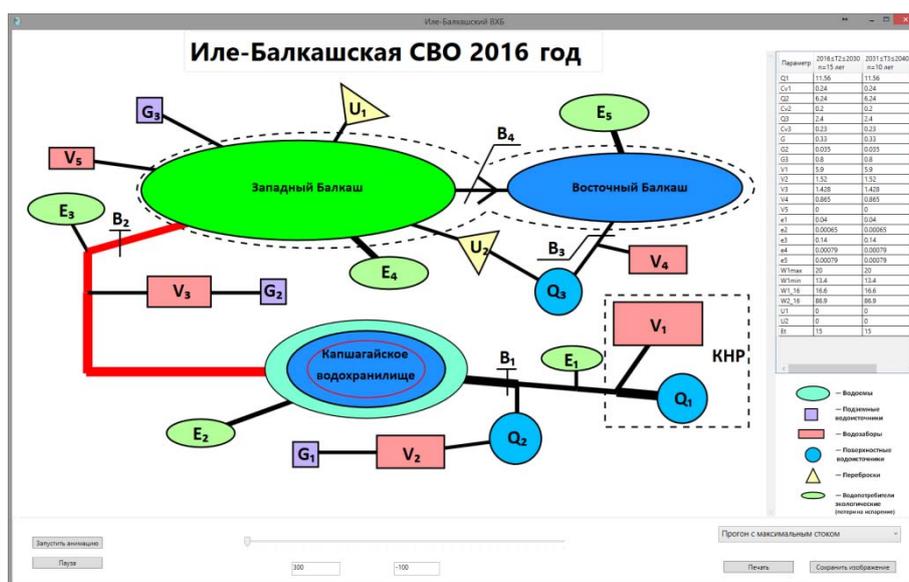


Рисунок 5 – Диаграмма модулей и связей между ними



а



б

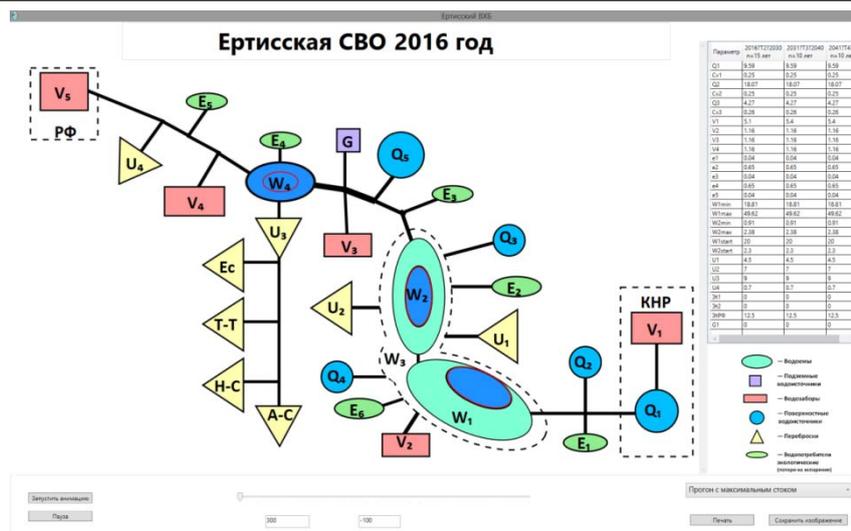


Рисунок 6 – Двумерная компьютерная визуализация имитационной модели развития СВО: а – Арало-Сырдаринский бассейн; б – Иле-Балкашский бассейн; в – Ертисский бассейн

**Выводы.** Предложена методика имитационного динамико-стохастического моделирования систем водообеспечения Республики Казахстан. Впервые создан инструмент (первый эскиз модели) поддержки принятия решений в области стратегического планирования развития Национального водохозяйственного комплекса, в том числе реконструкции системной водохозяйственной инфраструктуры, сохранения и восстановления природных водных объектов, обоснования хозяйственных лимитов водопотребления, совершенствования межгосударственного вододелия.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Мальковский И.М., Толеубаева Л.С., Толекова А., Долбешкин М.В., Пузиков Е.М. Оценочная модель сценариев развития единой системы водообеспечения Республики Казахстан // Вопросы географии и геоэкологии. – Алматы, 2015. – № 2. – С. 15-25.

[2] Сванидзе Г.Г. основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. – Тбилиси: Мецниерба, 1964. – 268 с.

[3] Водно-энергетические расчеты методом Монте-Карло. – М.: Энергия, 1969. – 362 с.

[4] Мальковский И.М. Географические основы водообеспечения природно-хозяйственных систем Казахстана. – Алматы, 2008. – 204 с.

[5] Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. В 30 т. – Алматы, 2012.

[6] Медеу А.Р., Мальковский И.М., Толеубаева Л.С. Управление водными ресурсами Республики Казахстан: проблемы и решения // Материалы I международной научно-практической конференции «Гидрология и инновационные технологии в водном хозяйстве». – Астана, 2015. – С. 18-22.

[7] Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II. – М.: Мир, 1987. – 646 с.

[8] Лузина Л.И. Компьютерное моделирование. – Томск, 2001. – 105 с.

[9] Поляков Н.А. История имитационного моделирования <http://simulation.su/uploads/files/default/obzor-polyakov-1.pdf>.

[10] V. Manakou, P. Tsiakis, T. Tsiakis and A. Kungolos Management of the Hydrological Basin of Lake Koronia using Mathematical Programming <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=15664>.

[11] Кузьмин Е. В., Соколов В. А. О дисциплине специализации «Верификация программ» // Доклады II научно-методической конференции «Преподавание математики в компьютерных науках». – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – С. 91-101.

[12] Validating Computational Models, Kathleen M. Carley Associate Professor of Sociology Department of Social and Decision Sciences Carnegie Mellon University September 1996.

[13] Андреев А. М., Козлов И. А. Методы построения и верификации математических моделей систем реального времени // Инженерный вестник. – 12 декабрь 2014. – С. 607-625.